干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

# 浑善达克沙地锦鸡儿属(*Caragana*)灌丛沙堆形态特征研究

支　莹[1,2]，　刘树林[1]，　康文平[1]，　郭紫晨[1,2]，　冯　坤[1,2]
（1. 中国科学院西北生态环境资源研究院沙漠与沙漠化重点实验室，甘肃 兰州　730000；
2. 中国科学院大学，北京　100049）

**摘　要：**灌丛沙堆在维持草地生态功能和土地沙漠化过程中扮演着非常重要角色。浑善达克沙地分布着众多灌丛沙堆，其中以锦鸡儿属(*Caragana*)灌丛沙堆最为典型。选择不同沙漠化程度(轻度沙漠化、中度沙漠化、重度沙漠化、严重沙漠化)沙地上的锦鸡儿属灌丛沙堆，进行野外调查和灌丛沙堆形态指标测量，对比不同沙漠化程度沙地上锦鸡儿属灌丛沙堆的形态特征，分析灌丛和沙堆形态参数间的关系及其影响因子。结果表明：(1) 不同沙漠化程度沙地灌丛沙堆大小不同，总体表现为灌丛沙堆规模从严重沙漠化、重度沙漠化、中度沙漠化到轻度沙漠化逐渐减小的特点，轻度和中度沙漠化沙地的灌丛沙堆形态在水平面上的垂直投影类似椭圆形、形状类似半椭圆球体，重度和严重沙漠化沙地的灌丛沙堆形态在水平面上的垂直投影类似不规则棱形、形状类似四棱锥体，沙堆形态的主要影响因素可能与沙源丰富度有关。(2) 不同沙漠化程度沙地上的锦鸡儿属灌丛的各形态参数呈显著相关，重度和严重沙漠化沙地上的锦鸡儿属灌丛沙堆形态参数间的相关系数比中度和轻度的更高，总体上灌丛沙堆长轴、短轴和沙堆高度之间协同发展。(3) 轻度和中度沙漠化沙地上的锦鸡儿属灌丛沙堆的长轴、短轴与高度间呈幂函数关系，表明灌丛沙堆还存在较大发展空间，重度和严重沙漠化沙地上灌丛沙堆的长轴、短轴与高度间呈二次函数关系，表明灌丛沙堆已经发育成熟，且易因根系水分供应不足等导致灌丛向衰亡方向发展。

**关 键 词：**锦鸡儿属；灌丛沙堆；形态特征；浑善达克沙地
**文章编号：**

灌丛沙堆是干旱、半干旱及半湿润荒漠地区风沙流遇到灌丛阻拦而堆积形成的一种地貌形态[1]，其形态及规模受风力强度、植被以及沙源丰富度影响[2]，高度从十几厘米至十几米不等，直径最大可达几十米，形态则多呈圆包、椭球体或圆锥体。目前，对灌丛沙堆的研究主要侧重于形成发育过程[3]、形态特征[4-6]、沉积演化[7-8]、空间分布格局[9]以及在生态系统中的作用[10]等方面。其中，就灌丛沙堆形态特征而言，多数研究是通过定量分析不同生境下不同类型的灌丛沙堆形态参数间的关系来反映沙堆形态差异，进而阐明其形成、发育与演化过程。譬如，灌丛植被生长发育状况和沙源条件是控制单个灌丛沙堆规模的主要因素，并且发现沙堆水平尺度与高度呈二次多项式关系[11]，张媛媛等[12]的研究也表明灌丛植被的形态和发育特征影响着沙堆形态的发育。左合君等[13]研究了阿拉善戈壁区白刺灌丛沙堆的形态特征，研究结果显示灌丛形态和沙堆形态指标间存在良好相关性，并且其规模大小受到沙源和风力以及灌丛的影响。

然而，上述研究大多都针对干旱、半干旱区不同演化阶段的灌丛沙堆形态差异，而较少将灌丛沙堆的发育状态与沙漠化联系起来。灌丛沙堆生长发育在沙漠化逆向或者正向发展中起到什么作用？多数研究只讨论了灌丛沙堆对区域土地沙漠化的指示作用，缺乏对不同沙漠化程度灌丛沙堆生长发育特征差异的对比研究。值得注意的是灌丛

**收稿日期：**2020-09-26；　**修订日期：**2020-12-13
**基金项目：**国家重点研发计划课题(2016YFC0500902)
**作者简介：**支莹(1998-)，女，硕士研究生，主要从事沙漠化与沙漠环境研究. E-mail: zhiying@lzb.ac.cn
**通讯作者：**刘树林(1979-)，男，博士，研究员，主要从事沙漠与沙漠化研究. E-mail: liusl@lzb.ac.cn

沙堆的出现是沙漠化过程的1种重要景观标志，按照沙漠化程度划分，灌丛沙堆表现出来的景观特征也有所差异：轻度沙漠化沙地灌丛生长茂盛，中度沙漠化沙地灌丛沙堆迎风侧显现流沙，重度沙漠化灌丛开始死亡且流沙面积超过50%，严重沙漠化沙地流动起伏且植被盖度小于10%[14]。可见灌丛沙堆形态与沙漠化程度是紧密相连、相互影响的。但是，现有研究对灌丛沙堆形态特征差异和沙漠化程度间的联系尚不清楚，灌丛沙堆对不同沙漠化程度的响应变化规律也不明确。

锦鸡儿属灌丛沙堆主要分布在我国北方干旱、半干旱地区，其形态、规模及发展演化对于区域土地沙漠化的发展具有重要指示作用[14]。本研究选择浑善达克沙地的锦鸡儿属灌丛沙堆为研究对象，通过野外调查，对不同沙漠化程度沙地上锦鸡儿灌丛沙堆的形态特征进行对比，分析探讨不同沙漠化程度沙地上锦鸡儿属灌丛沙堆的发育特点，查明不同影响因子对灌丛沙堆形态、生长发育的影响，为土地沙漠化发展阶段的评估与演变趋势的分析等提供参考依据。

## 1　材料与方法

### 1.1　研究区概况

浑善达克沙地位于我国内蒙古高原东南部，处于内蒙古北部干燥剥蚀高平原、北东向大兴安岭山地和东南向阴山山地三者的交汇部位，行政区划上主要包括内蒙古锡林郭勒盟中西部和赤峰市西部。该区属于半干旱干草原带，温带大陆性气候特征明显。年平均气温0~3 ℃，年温差和日温差较大，有利于物质的形成和积累；年日照时数3000~3200 h，≥10 ℃积温2000~2600 ℃，西部最高可达2700 ℃；无霜期100~110 d，较丰富的热量和光照，可以满足夏季作物和牧草的需要。受东南季风的影响，降水量自东南向西北递减，东南部年降水350~400 mm，西北部为100~200 mm，年蒸发量为2000~2700 mm。冬春季风强而多，4~5月风速较大，高达12级，年平均风速3.5~5.0 m·s$^{-1}$，年大风日数50~80 d，是全国沙区最大风区之一。该沙地的地带性土壤以栗钙土为主，其次为棕钙土，非地带性土壤主要为风沙土。浑善达克沙地植被以草原植被为主，沙地西部的固定、半固定沙丘是以小叶锦鸡儿（*Caragana microphylla*）、矮锦鸡儿（*Caragana pygnaea*）、沙蒿（*Artemisia desertorum*）、沙竹（*Phyllostachys propinqua*）群丛为主，混生有冷蒿（*Artemisia frigida*）、蒙古莸（*Caryopteris mongholica*）、砂蓝刺头（*Echinops gmelini*）、戈壁天门冬（*Asparagus gobicus*）、糙隐子草（*Cleistogenes squarrosa*）、针茅（*Stipa capillata*）等[14]。

### 1.2　研究方法

**1.2.1　样点选取**　在浑善达克沙地西部选取了发育有锦鸡儿属灌丛沙堆的不同沙漠化程度沙地样点27个（图1），基本信息见表1。在不同沙漠化程度沙地上对锦鸡儿属灌丛沙堆形态进行了野外实地调查测量。

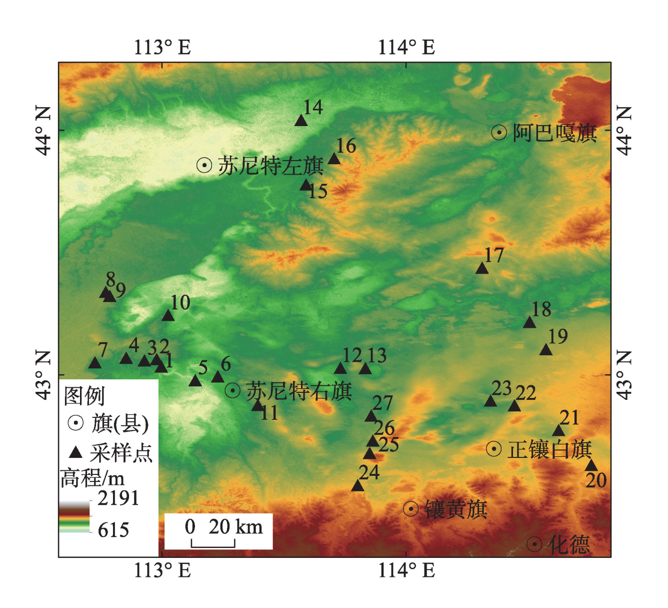



图1　浑善达克沙地采样点位置示意图

Fig. 1　Location of sampling sites in the Otindag Sandy Land

**1.2.2　测量指标及数据处理**　对27个采样点中的锦鸡儿灌丛沙堆进行测量，每个采样点随机测量10个以上典型的、无人为破坏且相互之间独立的锦鸡儿属灌丛沙堆，本研究总共测量了303个锦鸡儿属灌丛沙堆。测量指标包括灌丛指标参数和沙堆指标参数，灌丛参数包括冠幅长度（$L_p$）、冠幅宽度（$W_p$）、灌丛高度（$H_p$），沙堆参数包括沙堆长轴（$L_d$）、沙堆短轴（$W_d$）、沙堆高度（$H_d$）。

沙堆底面积（$S_d$）与体积（$V_d$）指标参数的计算：由于不同沙漠化程度的锦鸡儿属灌丛沙堆形态特征存在差异，因此计算底面积和体积时需要采用不同的计算方法[15]。

（1）轻度、中度沙漠化沙地上的沙堆在水平面上的垂直投影呈椭圆形，类似半椭圆球体：

表1　采样点基本信息表

Tab. 1　Basic information of sampling points

| 沙漠化程度 | 样点编号 | 地貌景观 | 风沙活动特点 | 人为干扰程度 | 植物类型 | | | 盖度/% |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 灌木层优势种 | 草本层优势种 | 草本层伴生种 | |
| 轻度 | 13,14,15,16,17,26 | 缓起伏半固定沙丘或平缓灌丛退化草地，灌丛均匀分布 | 较弱 | 放牧干扰较为严重 | 小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*) | 冷蒿(*Artemisia frigida*)/戈壁天门冬(*Asparagus gobicus*)/苔草(*Carex tristachya*)/沙葱(*Allium mongolicum*)/针茅(*Stipa capillata*)/阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicu*) | 狭叶锦鸡儿(*Caragana stenophylla*) | 20~35 |
| 中度 | 8,18,22,23,24,25 | 平坦灌丛沙堆地或缓起伏半固定灌丛沙地 | 中等强烈 | 轻-中度 | 小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*) | 针茅(*Stipa capillata*)/沙竹(*Phyllostachys propinqua*)/银灰旋花(*Convolvulus ammannii*)/冷蒿(*Artemisia frigida*)/戈壁天门冬(*Asparagus gobicus*) | 砂蓝刺头(*Echinops gmelini*)/戈壁天门冬(*Asparagus gobicus*)/阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicu*) | 15~25 |
| 重度 | 1,2,3,5,11,19,20,21,27 | 多处于风沙口，沙源丰富，起伏半流动灌丛沙地景观 | 地表起沙强烈 | 轻度 | 小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*) | 沙竹(*Phyllostachys propinqua*)/骆驼蓬(*Peganum harmala*)/针茅(*Stipa capillata*)/冷蒿(*Artemisia frigida*) | 沙米(*Agriophyllum squarrosum*) | 10~20 |
| 严重 | 4,6,7,9,10,12 | 典型平缓半流动沙丘，存在大风蚀坑，基岩出露地形 | 严重起沙 | 较少 | 小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*) | 沙竹(*Phyllostachys propinqua*)/沙米(*Agriophyllum squarrosum*) | - | 5~10 |

$$S_d = \frac{1}{4} \times \pi \times L_d \times W_d \tag{1}$$

$$V_d = \frac{1}{6} \times \pi \times L_d \times W_d \times H_d \tag{2}$$

（2）重度、严重沙漠化沙地上的沙堆顶部和尾部都有积沙，尾部沙尾更长，底面积类似菱形，形态呈四棱锥：

$$S_d = \frac{1}{2} \times L_d \times W_d \tag{3}$$

$$V_d = \frac{1}{6} \times L_d \times W_d \times H_d \tag{4}$$

以上数据采用Excel进行统计分析，采用SPSS 19进行Person相关和回归分析。

## 2　结果与分析

### 2.1　锦鸡儿灌丛沙堆形态特征

对27个采样点内的锦鸡儿属灌丛沙堆进行统计分析，从表2可得不同沙漠化程度沙地上锦鸡儿属灌丛和沙堆形态特征均有明显差异。

在轻度沙漠化沙地上，锦鸡儿属灌丛长度、宽度、高度平均值分别为129.6 cm、140.6 cm、47.6 cm。由于附近草本植物较多，对风沙具有一定的阻拦作用，因此缺少沙源供应，锦鸡儿属灌丛沙堆发育受到限制。沙堆长轴平均值为255.2 cm，短轴平均值为133.6 cm，沙堆长轴和短轴之比为1.91:1，沙堆高度平均值为17.8 cm，沙堆形态大多呈半椭球体，高度较低，灌丛基本覆盖沙堆，沙堆基本被固定，保护灌丛基部不被风蚀。

在中度沙漠化沙地上，锦鸡儿属灌丛长度、宽度、高度平均值分别为194.0 cm、196.5 cm、67.6 cm，宽度基本与长度一致，锦鸡儿属灌丛发育较均匀，相较于轻度沙漠化沙地，锦鸡儿属灌丛个头稍大、发育得较好。沙堆长轴平均值为383.9 cm，短轴平均值为187.6 cm，长短轴之比为2.05:1，沙堆高度平均值为34.8 cm，沙堆基本被灌丛包裹，形成较大的锦鸡儿属灌丛沙堆，形态近似半椭球体。

在重度沙漠化沙地上，锦鸡儿属灌丛长度、宽度、高度平均值分别为243.9 cm、247.0 cm、83.7 cm，由于风沙活动较强烈，沙源也较丰富，相比轻度和中度沙漠化沙地，锦鸡儿属灌丛发育得更大。沙堆长轴平均值为475.1 cm，短轴平均值为237.2 cm，长短轴之比为2.00:1，沙堆高度平均值为44.9 cm。相比轻度和中度沙漠化沙地，灌丛沙堆生长发育得更大，且沙堆长轴平均值为灌丛长度平均值的2倍，这是由于在风的吹蚀作用下沙粒在灌丛背风坡形成一条长长的沙尾，迎风坡也略有流沙堆积，其底面

表2 锦鸡儿属灌丛形态参数和沙堆形态参数

Tab. 2 Morphological parameters of *Caragana* shrub-coppice dune

| 沙漠化程度 | | $L_p$/cm | $W_p$/cm | $H_p$/cm | $L_d$/cm | $W_d$/cm | $H_d$/cm | $S_d$/cm$^2$ | $V_d$/10$^6$cm$^3$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 轻度 | 最大值 | 272.0 | 350.0 | 123.0 | 528.0 | 353.0 | 84.0 | 138068.28 | 4.658 |
| | 最小值 | 38.0 | 46.0 | 15.0 | 76.0 | 42.0 | 5.0 | 2803.87 | 0.018 |
| | 平均值 | 129.6 | 140.6 | 47.6 | 255.2 | 133.6 | 17.8 | 30961.50 | 0.494 |
| | 标准误差 | 51.2 | 62.2 | 23.1 | 109.3 | 60.8 | 12.0 | 27260.80 | 0.780 |
| 中度 | 最大值 | 376.0 | 374.0 | 175.0 | 766.0 | 355.0 | 64.0 | 203240.62 | 8.298 |
| | 最小值 | 80.0 | 83.0 | 29.0 | 145.0 | 64.0 | 12.0 | 7288.49 | 0.073 |
| | 平均值 | 194.0 | 196.5 | 67.6 | 383.9 | 187.6 | 34.8 | 64020.04 | 1.753 |
| | 标准误差 | 70.2 | 67.8 | 24.7 | 143.0 | 72.3 | 12.6 | 47834.7 | 1.823 |
| 重度 | 最大值 | 1160.0 | 1050.0 | 250.0 | 1500.0 | 1060.0 | 147.0 | 793940.00 | 30.434 |
| | 最小值 | 42.0 | 56.0 | 20.0 | 115.0 | 47.0 | 8.0 | 2702.50 | 0.014 |
| | 平均值 | 243.9 | 247.0 | 83.7 | 475.1 | 237.2 | 44.9 | 73374.22 | 1.865 |
| | 标准误差 | 148.2 | 144.9 | 39.9 | 255.0 | 152.6 | 27.4 | 116256.12 | 4.825 |
| 严重 | 最大值 | 762.0 | 802.0 | 303.0 | 2402.0 | 840.0 | 342.0 | 1008840.00 | 82.725 |
| | 最小值 | 66.0 | 75.0 | 27.0 | 101.0 | 66.0 | 10.0 | 4191.50 | 0.018 |
| | 平均值 | 215.5 | 221.1 | 85.3 | 452.3 | 215.1 | 51.0 | 68273.75 | 2.849 |
| | 标准误差 | 122.2 | 128.8 | 46.2 | 314.2 | 147.3 | 48.8 | 131806.33 | 10.851 |

注：$L_p$为冠幅长度，$W_p$为冠幅宽度，$H_p$为灌丛高度；$L_d$为沙堆长轴，$W_d$为沙堆短轴，$H_d$沙堆高度；$S_d$为沙堆底面积、$V_d$为沙堆体积。下同。

类似不规则棱形，形态类似四棱锥。

在严重沙漠化沙地上，锦鸡儿属灌丛长度、宽度、高度平均值分别为215.5 cm、221.1 cm、85.3 cm，较重度沙漠化沙地上的灌丛稍小，但比轻度和中度沙漠化沙地上的灌丛要大。沙堆长轴平均值为452.3 cm，短轴平均值为215.1 cm，长短轴之比为2.10:1，沙堆平均高度为51.0 cm。由于起沙严重，对锦鸡儿属灌丛沙堆吹蚀作用强烈，部分灌丛沙堆底部风蚀严重，致使灌丛根部裸露地表，但由于沙源供应充足，促使灌丛生长发育，因此沙堆大小比轻度和中度沙漠化沙地上的要更大。

轻度、中度、重度和严重沙漠化沙地上锦鸡儿属灌丛沙堆的体积平均值依次为0.494×10$^6$ cm$^3$、1.753×10$^6$ cm$^3$、1.865×10$^6$ cm$^3$、2.849×10$^6$ cm$^3$，由此可见锦鸡儿属灌丛沙堆发育规模大小总体表现为严重沙漠化>重度沙漠化>中度沙漠化>轻度沙漠化，沙源丰富与否是影响灌丛沙堆生长发育的重要因素之一。

### 2.2 锦鸡儿属灌丛沙堆形态参数相关性分析

不同沙漠化程度沙地上的锦鸡儿属灌丛沙堆形态参数间均呈显著相关(表3)。中度沙漠化地区灌丛长度($L_p$)与灌丛宽度($W_p$)、灌丛长度($L_p$)与灌丛高度($H_p$)、灌丛宽度($W_p$)与灌丛高度($H_p$)之间的相关系数分别为0.834、0.498、0.460；严重沙漠化上相应的相关系数分别为0.923、0.731、0.750。相比之下严重沙漠化中的锦鸡儿灌丛参数间相关性最好，中度沙漠化中的锦鸡儿属灌丛相关性最差。

不同沙漠化程度沙地上的沙堆各参数间也存在着相关性，轻度沙漠化沙地上沙堆长轴($L_d$)与沙堆短轴($W_d$)、沙堆长轴($L_d$)与沙堆高度($H_d$)、沙堆短轴($W_d$)与沙堆高度($H_d$)之间的相关系数分别为0.802、0.576、0.547；而重度沙漠化沙地上与严重沙漠化沙地上，相应的相关系数依次为0.875、0.791、0.778和0.848、0.830、0.798。重度和严重沙漠化沙地上沙堆各参数间的相关性相似，轻度沙漠化沙地上沙堆参数相关性最差。

灌丛参数和沙堆参数间也存在较好的相关性，轻度沙漠化沙地上灌丛宽度($W_p$)与沙堆短轴($W_d$)、沙堆短轴($W_d$)与沙堆长轴($L_d$)相关性最高，相关系数分别为0.928、0.840，前者呈极显著相关；中度沙漠化沙地上灌丛长度($L_p$)与沙堆长轴($L_d$)、灌丛宽度($W_p$)与沙堆短轴($W_d$)都呈极显著相关，相关系数分别为0.918、0.947；重度沙漠化沙地上灌丛宽度($W_p$)与沙堆短轴($W_d$)、灌丛长度($L_p$)与沙堆短轴($W_d$)的相关系数最高，分别为0.979、0.895，前者为极显著相关；严重沙漠化沙地上灌丛宽度($W_p$)与沙

表3 锦鸡儿属灌丛沙堆形态参数相关性分析

Tab. 3 Correlation analysis of morphological parameters of *Caragana* shrub-coppice dune

| 沙漠化程度 | 形态参数 | $L_p$ | $W_p$ | $H_p$ | $L_d$ | $W_d$ | $H_d$ | $S_d$ | $V_d$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 轻度 | $L_p$ | 1.000 | | | | | | | |
| | $W_p$ | 0.727** | 1.000 | | | | | | |
| | $H_p$ | 0.660** | 0.735** | 1.000 | | | | | |
| | $L_d$ | 0.833** | 0.840** | 0.799** | 1.000 | | | | |
| | $W_d$ | 0.699** | 0.928** | 0.684** | 0.802** | 1.000 | | | |
| | $H_d$ | 0.460** | 0.583** | 0.539** | 0.576** | 0.547** | 1.000 | | |
| | $S_d$ | 0.725** | 0.917** | 0.803** | 0.908** | 0.937** | 0.574** | 1.000 | |
| | $V_d$ | 0.532** | 0.761** | 0.735** | 0.752** | 0.743** | 0.862** | 0.834** | 1.000 |
| 中度 | $L_p$ | 1.000 | | | | | | | |
| | $W_p$ | 0.834** | 1.000 | | | | | | |
| | $H_p$ | 0.498** | 0.460** | 1.000 | | | | | |
| | $L_d$ | 0.918** | 0.879** | 0.559** | 1.000 | | | | |
| | $W_d$ | 0.876** | 0.947** | 0.560** | 0.918** | 1.000 | | | |
| | $H_d$ | 0.609** | 0.708** | 0.667** | 0.676** | 0.701** | 1.000 | | |
| | $S_d$ | 0.890** | 0.914** | 0.527** | 0.969** | 0.950** | 0.668** | 1.000 | |
| | $V_d$ | 0.814** | 0.867** | 0.545** | 0.911** | 0.884** | 0.764** | 0.960** | 1.000 |
| 重度 | $L_p$ | 1.000 | | | | | | | |
| | $W_p$ | 0.898** | 1.000 | | | | | | |
| | $H_p$ | 0.643** | 0.742** | 1.000 | | | | | |
| | $L_d$ | 0.855** | 0.875** | 0.722** | 1.000 | | | | |
| | $W_d$ | 0.895** | 0.979** | 0.707** | 0.875** | 1.000 | | | |
| | $H_d$ | 0.723** | 0.772** | 0.821** | 0.791** | 0.778** | 1.000 | | |
| | $S_d$ | 0.865** | 0.930** | 0.657** | 0.895** | 0.945** | 0.721** | 1.000 | |
| | $V_d$ | 0.809** | 0.889** | 0.641** | 0.850** | 0.904** | 0.726** | 0.984** | 1.000 |
| 严重 | $L_p$ | 1.000 | | | | | | | |
| | $W_p$ | 0.923** | 1.000 | | | | | | |
| | $H_p$ | 0.731** | 0.750** | 1.000 | | | | | |
| | $L_d$ | 0.730** | 0.727** | 0.873** | 1.000 | | | | |
| | $W_d$ | 0.896** | 0.954** | 0.829** | 0.848** | 1.000 | | | |
| | $H_d$ | 0.740** | 0.704** | 0.851** | 0.830** | 0.798** | 1.000 | | |
| | $S_d$ | 0.663** | 0.709** | 0.808** | 0.944** | 0.851** | 0.787** | 1.000 | |
| | $V_d$ | 0.517** | 0.548** | 0.751** | 0.885** | 0.719** | 0.813** | 0.957** | 1.000 |

注:**为0.01水平(双侧)上显著相关。

堆短轴($W_d$)、灌丛长度($L_p$)与沙堆短轴($W_d$)的相关系数最高,分别为0.954、0.896。灌丛宽度($W_p$)与沙堆短轴($W_d$)的相关性在轻度、中度、重度、严重4种沙漠化程度沙地中相关系数都是最高的,都呈极显著相关。

### 2.3 锦鸡儿灌丛沙堆形态参数回归统计分析

通过相关性分析可知,轻度、中度、重度和严重沙漠化程度沙地中的沙堆长轴($L_d$)、沙堆短轴($W_d$)和沙堆高度($H_d$)之间存在着显著的相关性,即沙堆长轴、短轴与高度之间协同发展,因此还可以探讨锦鸡儿属灌丛沙堆水平尺度[1/2(长轴+短轴)]与高度之间的关系,对不同沙漠化程度沙堆长轴和高度、短轴和高度、水平尺度($D_d$)和高度进行回归分析,可以从沙堆形态方面对比中得出锦鸡儿属灌丛沙堆在不同沙漠化程度中的特点。

对轻度沙漠化沙地上的锦鸡儿属灌丛沙堆参数进行回归分析(图2)可知,锦鸡儿属沙堆长轴与高度的拟合函数为:$H_d=0.202L_d^{0.791}$,$R^2$=0.354;沙堆短轴与高度的拟合函数为:$H_d=0.327W_d^{0.798}$,$R^2$=0.368。可以看出沙堆长轴和短轴与高度拟合的$R^2$

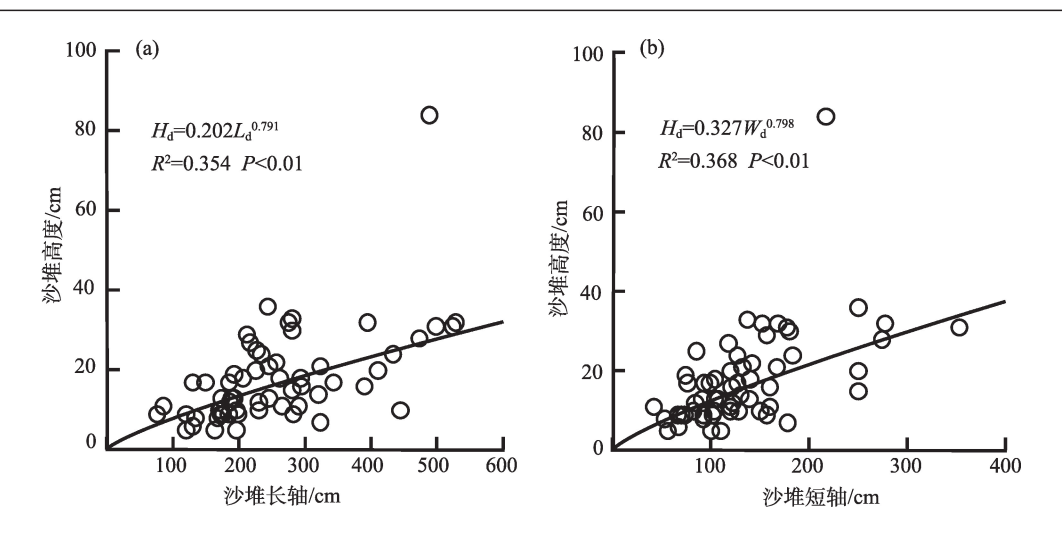



图2　轻度沙漠化沙地上锦鸡儿属灌丛沙堆参数间关系

Fig. 2　Relationship between parameters of *Caragana* shrub-coppice dune on mild desertified sandy land

均不高，表明灌丛沙堆规模较小时，灌丛沙堆发育还不够稳定，且沙堆短轴与高度拟合的幂次方更大，说明沙堆高度随沙堆短轴增长的更快。

对中度沙漠化沙地上的锦鸡儿属灌丛沙堆参数进行回归分析(图3)可知，锦鸡儿属沙堆长轴与高度的拟合函数为：$H_d=0.391L_d^{0.750}$，$R^2$=0.473；沙堆短轴与高度的拟合函数：$H_d=0.759W_d^{0.727}$，$R^2$=0.540。其参数间的$R^2$值均高于轻度沙漠化沙地上的锦鸡儿属沙堆参数的$R^2$值，表明处于中度沙漠化沙地上的锦鸡儿属灌丛沙堆发育得更好。沙堆长轴与高度拟合的幂次方更大，说明中度沙漠化沙地上的沙堆高度随沙堆长轴增长得更快。

对重度沙漠化沙地上的锦鸡儿属灌丛沙堆参数进行回归分析(图4)可知，沙堆长轴与高度：$H_d=-1.215\times10^{-5}L_d^2+0.103L_d-0.601$，$R^2$=0.628；沙堆短轴与高度：$H_d=0.0001W_d^2+0.246W_d-4.138$，$R^2$=0.645。重度沙漠化中的最优拟合方程均为二次方程，灌丛沙堆高度随着沙堆长轴和短轴先增后减。

对严重沙漠化沙地上的锦鸡儿属灌丛沙堆参数进行回归分析(图5)可知，沙堆长轴与高度间的拟合函数：$H_d=-1.803\times10^{-5}L_d^2+0.166L_d-18.678$，$R^2$=0.699；沙堆短轴与高度间的拟合函数：$H_d=-3.331\times10^{-5}W_d^2+0.29W_d-9.103$，$R^2$=0.637。其中，严重沙漠化沙地上的沙堆长轴和高度拟合效果比轻度、中度和重度沙漠化沙地上的好，相关系数$R^2$达到0.699。

对轻度、中度、重度和严重沙漠化沙地上锦鸡

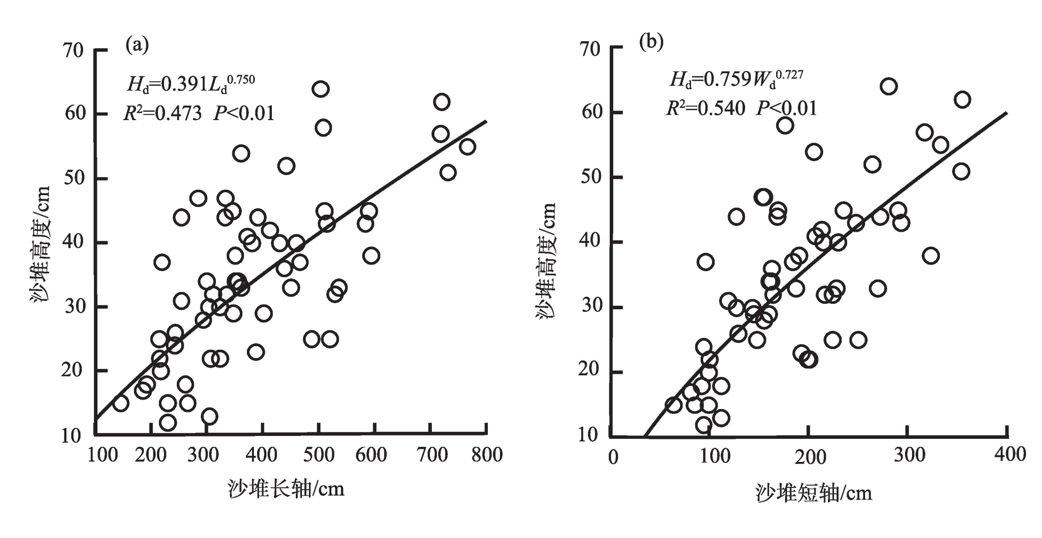



图3　中度沙漠化沙地上锦鸡儿属灌丛沙堆参数间关系

Fig. 3　Relationship between parameters of *Caragana* shrub-coppice dune on moderate desertified sandy land

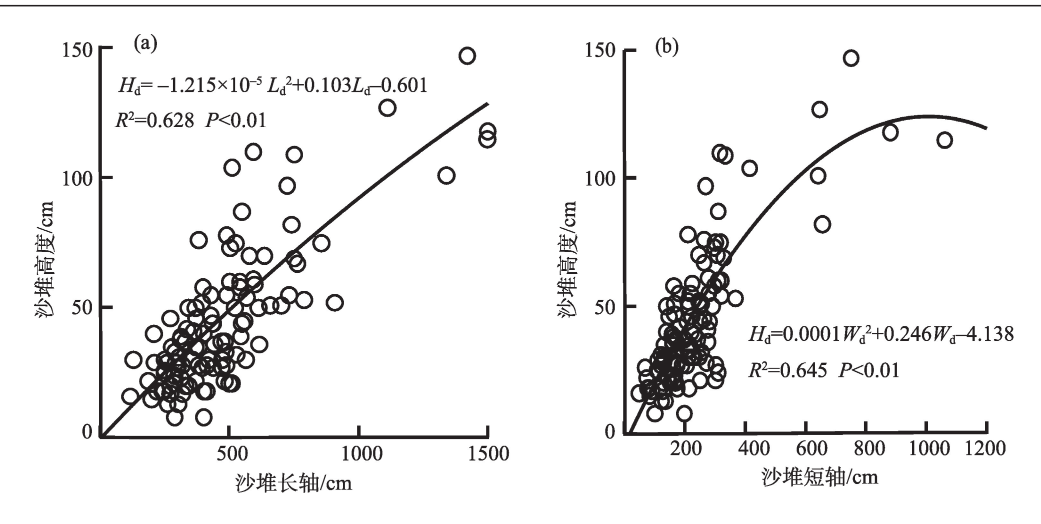



图4 重度沙漠化沙地上锦鸡儿属灌丛沙堆参数间关系

Fig. 4 Relationship between parameters of *Caragana* shrub-coppice dune on severe desertified sandy land

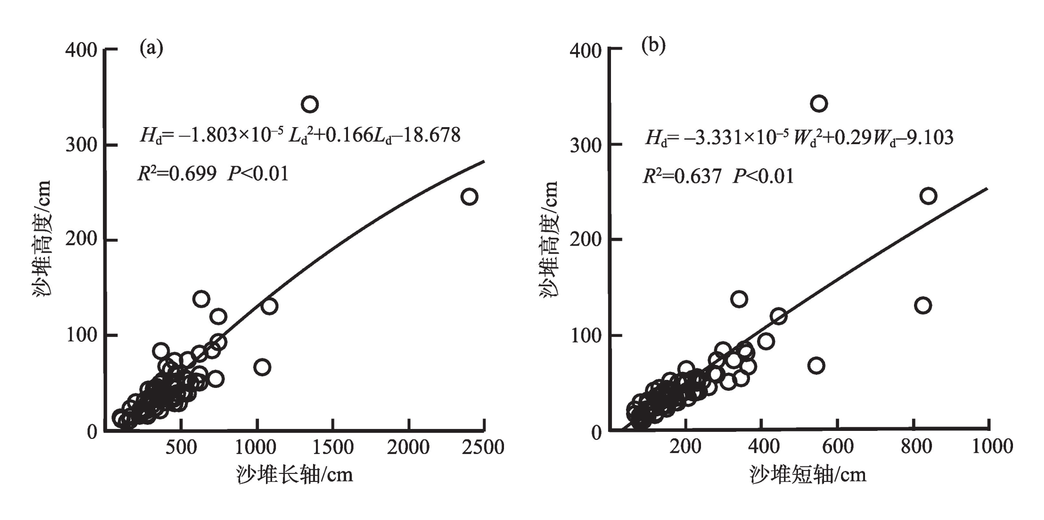



图5 严重沙漠化沙地上锦鸡儿属灌丛沙堆参数间关系

Fig. 5 Relationship between parameters of *Caragana* shrub on serious desertified sandy land

儿属灌丛沙堆的水平尺度和沙堆高度进行回归分析(图6),严重沙漠化中的$R^2$值最大。除了重度沙漠化中的拟合函数为二次函数,其余均为幂函数,可以明显地看出重度沙漠化沙地上的锦鸡儿属灌丛沙堆高度随水平尺度增长到一定程度上开始下降。相比于轻度和中度沙漠化,严重沙漠化沙地上的锦鸡儿属灌丛沙堆高度和水平尺度拟合函数的幂次方最大,说明严重沙漠化沙地上的沙堆高度随水平尺度增长的速率更大。

## 3 讨论

### 3.1 不同沙漠化沙地上锦鸡儿属灌丛沙堆的影响因素

不同沙漠化程度沙地上的锦鸡儿属灌丛沙堆规模差异明显,本研究结果表明沙堆大小随沙漠化程度的降低而减小,造成沙堆形态及大小差异的影响因子主要是植被、沙源丰富度及风况[2]。一般认为灌丛植被密度最佳为15%左右[16-17],由表1可知,处于严重沙漠化沙地上的锦鸡儿属灌丛沙堆的植被盖度≤10%,以及部分处于重度沙漠化沙地上的锦鸡儿属灌丛沙堆的植被盖度≤15%,加上本研究所进行的野外观测可知重度及严重沙漠化沙地多处于风沙口或近风蚀口,沙源丰富,起沙强烈,由于地表植被稀疏,对沙粒阻拦作用小,而灌丛的出现对风沙流具有拦截作用,使颗粒沉降堆积于灌丛附近,极易形成灌丛沙堆[18-19]。处于严重沙漠化程度和重度沙漠化程度的锦鸡儿灌丛沙堆一般处于发育或稳定阶段,沙埋一方面促进锦鸡儿属灌丛的生

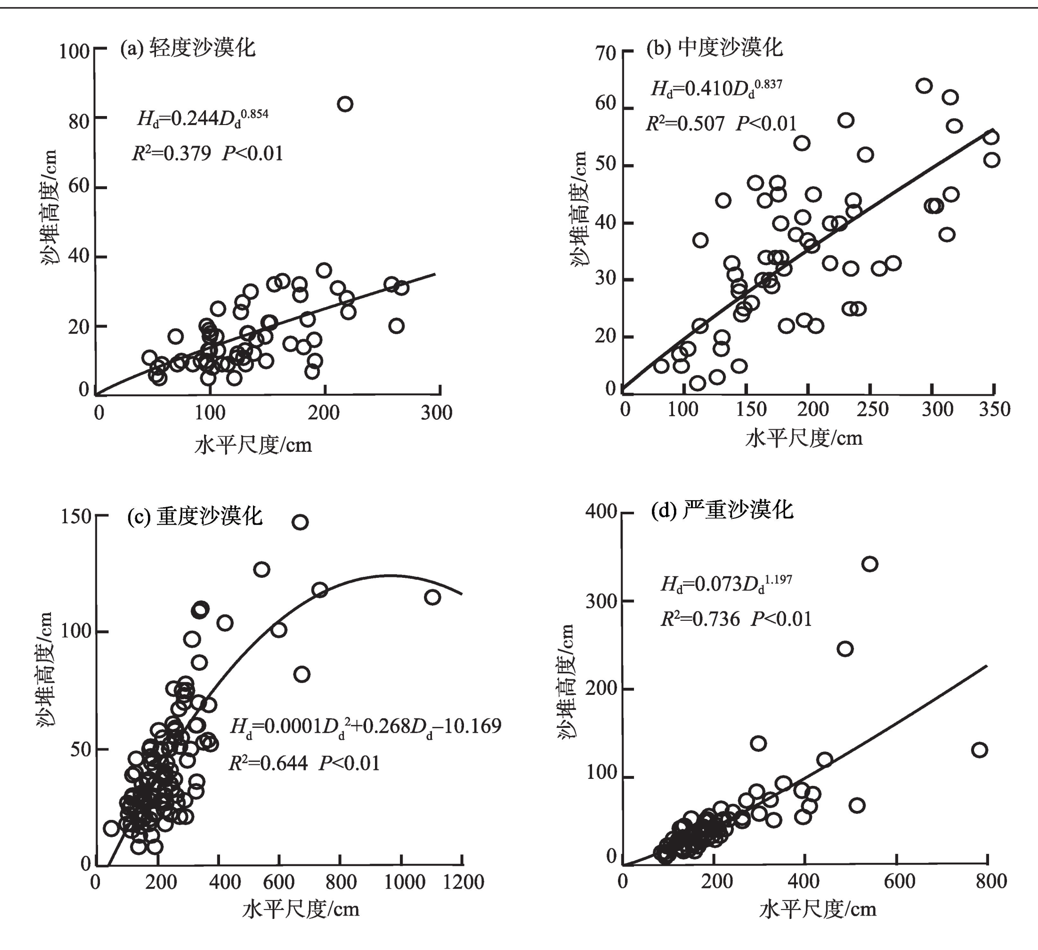



图6 不同沙漠化程度沙地上锦鸡儿属灌丛沙堆参数间关系

Fig. 6 Relationship between parameters of *Caragana* shrub-coppice dune on sandy land with different desertification degree

长发育，灌丛的发育反过来又能提高阻沙能力，这种互相促进作用使得灌丛沙堆逐渐扩大，形成较大的规模，且重度和严重沙漠化的沙地中基本无退化或衰亡阶段灌丛沙堆，可能是老化的灌丛极易被流沙掩埋所造成的[20]。轻度和中度沙漠化程度沙地内流沙活动较弱，沙源相对较少，适量的风沙有利于灌丛的发育，但很难形成较大规模且稳定的灌丛沙堆，由于地表植被盖度基本≥20%，风沙流遭到阻拦，积沙量显著下降，灌丛衰亡仍能留存地表。风力对灌丛沙堆形态塑造具有较大影响[21]，主要是通过对地表风沙流的干扰影响对灌丛的吹蚀作用，当风力强劲时，灌丛受到吹蚀作用较大，沙堆一般聚集于灌丛背风侧，在强烈风力作用下于灌丛背风侧形成长条沙尾[22]，重度及严重沙漠化程度沙地上的锦鸡儿灌丛沙堆基本呈四棱锥形态，这与本研究观测到的结果一致；当风力较弱时，风对沙粒吹蚀作用较小，沙堆堆积于灌丛内部，因此轻度及中度沙漠化状态下的锦鸡儿属灌丛沙堆外观形态呈圆包或椭球体形，这也使得灌丛沙堆处在更为稳定的状态[23]。轻度、中度、重度及严重沙漠化沙地上锦鸡儿属灌丛沙堆长轴和短轴比值分别为1.91、2.05、2.00、2.10，长轴普遍大于短轴，这也能从侧面反映灌丛沙堆在水平面上的垂直投影形态逐渐由椭圆向长条形演变。

### 3.2 不同沙漠化沙地上锦鸡儿属灌丛沙堆的发育规律

灌丛植被的形态特征影响着沙堆形态发育特征[11,24]，本文研究结果证实了灌丛和沙堆间形态参数呈显著相关，且沙堆发育规模越大，形态参数间的关系越明显。灌丛沙堆在生长发育过程中，其形态参数间存在着良好函数关系。一般来说，在增长阶段和稳定阶段，灌丛沙堆形态参数间多呈显著线性关系，而衰退阶段的灌丛沙堆多呈无规则状，其形态参数间关系不明显[6,13]。本研究结果表明不同沙漠化程度锦鸡儿属灌丛沙堆形态参数之间拟合模型为幂函数和二次函数这2种形式，虽然其最优

拟合模型不相同，但是明显地表现出沙堆高度随着沙堆长轴和短轴的增大而增大，说明三者之间是一个协同增长的过程。当拟合函数为幂函数，表明灌丛沙堆高度增长一定时，沙堆长轴增长速度要快于沙堆短轴增长速度，因此此时的沙堆一方面往高处发展，一方面也快速往长度发展。当拟合函数为二次函数，沙堆高度随长短轴增长速度先快后慢，且二次项系数为负，表明灌丛沙堆发育到一定程度后会停止直至衰亡。以往的研究结果表明灌丛沙堆的高度和长宽之间存在着良好的函数关系[25-26]，本文研究再次证明了这一结论。因此，区域环境变化状况可以通过灌丛沙堆的不同形态参数间关系特征反映出来，反之，灌丛沙堆的形态特征在某种程度上也反映了沙漠化的发展趋势。严重沙漠化程度沙地上锦鸡儿属灌丛沙堆高度与水平尺度的拟合幂函数系数最大，说明沙源丰富，发育更加迅速，灌丛沙堆的水平尺度发育速率要大于垂向发育速率。重度沙漠化沙地上灌丛沙堆基本达到拟合函数的最高值，已经有开始衰退的趋势，严重沙漠化沙地上的灌丛沙堆虽未达到拟合函数的最高值，但其发育增长的空间较小，轻度和中度沙漠化沙地上的锦鸡儿属灌丛沙堆发育空间要更大。说明灌丛沙堆在沙源丰富、水分充足、植被良好等有利条件下发育迅速[1,27]，且在我国干旱、半干旱地区，降雨对灌丛植被的生长发育也具有一定的影响[28]。但一旦超过阈值，灌丛极易朝衰亡方向发展，或者缺乏某些发育条件如沙源供应不足，灌丛沙堆也难以发展为较大的沙堆。

## 4 结 论

本研究以轻度、中度、重度以及严重沙漠化程度沙地上的锦鸡儿灌丛沙堆为研究对象，通过野外调查锦鸡儿灌丛沙堆形态特征，将锦鸡儿灌丛沙堆的发育状态和生长发育特征差异与沙漠化联系起来，以期为辅助解译判读沙漠化发展程度、揭示区域土地沙漠化过程提供可靠依据，得到以下结论：

（1）浑善达克沙地沙堆规模总体表现为从严重沙漠化、重度沙漠化、中度沙漠化到轻度沙漠化逐渐减小的特点，沙源丰富程度影响灌丛沙堆规模大小，在沙源较丰富的重度及严重沙漠化沙地上灌丛沙堆形态在空间上大多呈带沙尾状的四棱锥形，反之轻度和中度沙漠化沙地上灌丛沙堆形态在空间上大多呈半椭球体形。

（2）浑善达克沙地不同程度沙漠化沙地上的锦鸡儿属灌丛沙堆各个形态参数间都呈显著相关，沙堆长轴、短轴和高度三者之间协同发展，灌丛的发育良好与否影响沙堆发育规模大小。重度和严重沙漠化沙地上的锦鸡儿属灌丛沙堆形态参数相关性要好于轻度和中度，说明发育越成熟稳定和发育规模越大的灌丛沙堆形态参数间存在良好的相关关系。

（3）不同沙漠化程度沙地上的锦鸡儿属灌丛沙堆参数间存在一定函数关系，轻度和中度沙漠化沙地上沙堆长轴、短轴与高度间呈幂函数关系，重度和严重沙漠化沙地上沙堆长轴、短轴与高度呈二次函数关系，前者表明灌丛沙堆还处在发育状态，后者表明沙堆已经发育到一种成熟状态并且有向衰亡方向发展的趋势。

## 参考文献（References）


[1] Tengberg A, Chen D L. A comparative analysis of nebkhas in central Tunisia and northern Burkina Faso[J]. Geomorphology, 1998, 22(2): 181-192.

[2] Nicking W G, Wolfe S A. The morphology and origin of nabkhas, region of Mopti, Mali, west Africa[J]. Journal of Arid Environments, 1994, 28(1): 13-30.

[3] 武胜利. 新疆和田河流域灌(草)丛沙堆发育机制研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2007. [Wu Shengli. Study on development mechanism of nebkha in the basin of Hetian River, Xinjiang[D]. Shanghai: East China Normal University, 2007. ]

[4] Al-Awadhi J M, Al-Dousari A M. Morphological characteristics and development of coastal nabkhas, north-east Kuwait[J]. International Journal of Earth Ences, 2013, 102(3): 949-958.

[5] Yan N, Baas A C W. Environmental controls, morphodynamic processes, and ecogeomorphic interactions of barchan to parabolic dune transformations[J]. Geomorphology, 2017, 278: 209-237.

[6] 魏亚娟, 汪季, 党晓宏, 等. 不同生境白刺(*Nitraria tangutorum*)灌丛沙堆形态特征[J]. 干旱区研究, 2019, 36(1): 253-261. [Wei Yajuan, Wang Ji, Dang Xiaohong, et al. Morphological features of *Nitraria tangutorum* nebkhas in different habitats[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(1): 253-261. ]

[7] Gillies J A, Nield J M, Nickling W G. Wind speed and sediment transport recovery in the lee of a vegetated and denuded nebkha within a nebkha dune field[J]. Aeolian Research, 2014, 12: 135-141.

[8] 王懿萱, 陈天源, 吴蝉, 等. 柴达木盆地西台吉乃尔盐湖沉积的年代学研究[J]. 干旱区地理, 2019, 42(4): 876-884. [Wang Yixu-

an, Chen Tianyuan, Wu Chan, et al. Formation and evolution of the Xitaijinair Salt Lake in Qaidam Basin revealed by chronology [J]. Arid Land Geography, 2019, 42(4): 876-884. ]
[9] 刘旻霞, 夏素娟, 南笑宁, 等. 基于Ripley's *K*(*r*)函数的荒漠锦鸡儿种群分布格局[J]. 干旱区研究, 2019, 36(3): 606-613. [Liu Minxia, Xia Sujuan, Nan Xiaoning, et al. Distribution pattern of *Caragana roborovskyi* population based on Ripley's *K*(*r*) function [J]. Arid Zone Research. 2019, 36(3): 606-613. ]
[10] 杜建会, 严平, 董玉祥. 干旱地区灌丛沙堆研究现状与展望[J]. 地理学报, 2010, 65(3): 339-350. [Du Jianhui, Yan Ping, Dong Yuxiang. The progress and prospects of nebkhas in arid areas[J]. Acta Geographica Sinica, 2010, 65(3): 339-350. ]
[11] 张萍, 哈斯, 岳兴玲, 等. 白刺灌丛沙堆形态与沉积特征[J]. 干旱区地理, 2008, 31(6): 926-932. [Zhang Ping, Ha Si, Yue Xingling, et al. Morphology and sedimentary characteristics of *Nitraria tangutorum*[J]. Arid Land Geography, 2008, 31(6): 926-932. ]
[12] 张媛媛, 马成仓, 韩磊, 等. 内蒙古高原荒漠区四种锦鸡儿属植物灌丛沙包形态和固沙能力比较[J]. 生态学报, 2012, 32(11): 3343-3351. [Zhang Yuanyuan, Ma Chengcang, Han Lei, et al. Nabkha morphology and sand-fixing capability of four dominant *Caragana* species in the desert region of the Inner Mongolia Plateau[J]. Journal of Ecology, 2012, 32(11): 3343-3351. ]
[13] 左合君, 杨阳, 张宏飞, 等. 阿拉善戈壁区白刺灌丛沙堆形态特征研究[J]. 水土保持研究, 2018, 25(1): 263-269. [Zuo Hejun, Yang Yang, Zhang Hongfei, et al. Morphological characters of *Nitraria* dune in Gobi of Alxa[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(1): 263-269. ]
[14] 王涛. 中国沙漠与沙漠化[M]. 石家庄: 河北科学技术出版社. 2003: 137-140. [Wang Tao. Desert and desertification in China [M]. Shijiazhuang: Hebei Science and Technology Press, 2003: 137-140. ]
[15] El-Bana M I, Nijs I, Khedr A H A. The importance of phytogenic mounds (nebkhas) for restoration of arid degraded rangelands in northern Sinai[J]. Restoration Ecology, 2003, 11(3): 317-324.
[16] 吕萍, 董治宝, 赵爱国, 等. 灌丛密度对沙粒粒度和起动风速影响研究[J]. 泥沙研究, 2011(3): 63-66. [Lü Ping, Dong Zhibao, Zhao Aiguo, et al. Effect of shrub density on grain sizes and threshold wind velocity[J]. Journal of Sediment Research, 2011(3): 63-66. ]
[17] 谭凤翥, 王雪芹, 王海峰, 等. 柽柳灌丛沙堆三维流场随背景植被变化的风洞实验[J]. 中国沙漠, 2018, 38(1): 48-57. [Tan Fengzhu, Wang Xueqin, Wang Haifeng, et al. Wind tunnel simulation of the three-dimensional airflow patterns around *Tamarix ramosissima* nebkhas under the change of background vegetation coverage [J]. Journal of Desert Research, 2018, 38(1): 48-57. ]
[18] Langford R P. Nabkha (coppice dune) fields of south-central New Mexico, USA[J]. Journal of Arid Environments, 2000, 46(1): 25-41.
[19] 高永, 丁延龙, 汪季, 等. 不同植物灌丛沙丘表面沉积物粒度变化及其固沙能力[J]. 农业工程学报, 2017, 33(22): 135-142. [Gao Yong, Ding Yanlong, Wang Ji, et al. Sediments particle size changes and its sand fixation ability for different shrub dunes[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(22): 135-142. ]
[20] 陈东, 张宇清, 吴斌, 等. 毛乌素沙地南缘油蒿(*Artemisia ordosica*)灌丛沙堆形态特征[J]. 中国沙漠, 2015, 35(3): 565-572. [Chen Dong, Zhang Yuqing, Wu Bin, et al. The morphological characteristics of *Artemisia ordosica* nebkhas at different evolvement stages in southern margin of Mu Us Desert[J]. Journal of Desert Research, 2015, 35(3): 565-572. ]
[21] 詹科杰. 民勤荒漠绿洲过渡带白刺灌丛沙堆表面风沙输运特征与沙堆形成发育的关系研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2016. [Zhan Kejie. Researching of the coherence relationship between surface wind-sand flow characteristic and shaping of *Nitraria tangutorum* nebkhas[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2016. ]
[22] 常兆丰, 朱淑娟, 杜娟, 等. 民勤绿洲边缘积沙带形成的环境条件[J]. 干旱区地理, 2019, 42(6): 1330-1336. [Chang Zhaofeng, Zhu Shujuan, Du Juan, et al. Environmental factors causing the formation of sand-accumulation belt along the oasis fringe in Minqin[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(6): 1330-1336. ]
[23] 谢国勋, 罗维成, 赵文智. 荒漠草原带沙源及灌丛对灌丛沙堆形态的影响[J]. 中国沙漠, 2015, 35(3): 573-581. [Xie Guoxun, Luo Weicheng, Zhao Wenzhi. Effect of sand source and shrub features on nebkha morphological characteristics in desert steppe[J]. Journal of Desert Research, 2015, 35(3): 573-581. ]
[24] 高永, 党晓宏, 虞毅, 等. 乌兰布和沙漠东南缘白沙蒿(*Artemisia sphaerocphala*)灌丛沙堆形态特征与固沙能力[J]. 中国沙漠, 2015, 35(1): 1-7. [Gao Yong, Dang Xiaohong, Yu Yi, et al. Nabkha morphological characteristics and sand fixing capacity of *Artemisia sphaerocphala* in the south edge of the Ulan Buh Desert[J]. Journal of Desert Research, 2015, 35(1): 1-7. ]
[25] 孔芳芳, 谭利华, 伍永秋, 等. 柴达木盆地不同沉积区灌丛沙堆形态与沉积特征[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2016, 52(1): 56-62. [Kong Fangfang, Tan Lihua, Wu Yongqiu, et al. Mophology and sediments of nebkha in Qaidam Basin[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science Edition), 2016, 52(1): 56-62. ]
[26] 张萍, 哈斯·额尔敦, 杨一, 等. 小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)灌丛沙堆形态对沙源供给形式和丰富度的响应[J]. 中国沙漠, 2015, 35(6): 1453-1460. [Zhang Ping, Eerdun Hasi, Yang Yi, et al. Responses of nebkhas morphology to the mode and richness of sand supply[J]. Journal of Desert Research, 2015, 35(6): 1453-1460. ]
[27] 柳菲, 陈沛源, 于海超, 等. 民勤绿洲不同土地利用类型下土壤水盐的空间分布特征分析[J]. 干旱区地理, 2020, 43(2): 406-414. [Liu Fei, Chen Peiyuan, Yu Haichao, et al. Spatial distribution characteristics of soil water and salt under different land use types in Minqin[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(2): 406-414. ]
[28] Hu X X, Mitsuru H, Wu Y N, et al. Responses in gross primary production of *Stipa krylovii* and *Allium polyrhizum* to a temporal rainfall in a temperate grassland of Inner Mongolia, China[J]. Journal of Arid Land, 2019, 11(6): 824-836.

# Morphological characteristics of *Caragana* shrub-coppice dune in Otindag Sandy Land

ZHI Ying[1,2], LIU Shulin[1], KANG Wenping[1], GUO Zichen[1,2], FENG Kun[1,2]

(1. Key Laboratory of Desert and Desertification, Northwest Institute of Ecology and Environmental Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, Gansu, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** A shrub-coppice dune is a geomorphic form formed by the accumulation of wind-blown sand flow in arid, semi-arid, and semi humid desert areas. Shrub-coppice dunes play an important role in maintaining the grassland ecological function and land desertification. In this study, the Otindag Sandy Land in the Inner Mongolia Plateau of China, which is rich in eolian sand activities, was selected to better explain the indicative effect of shrub-coppice dunes on land desertification. The Otindag Sandy Land has large and small shrub-coppice dunes. The *Caragana* shrub is the most typical in the area. Accordingly, the *Caragana* shrub on sandy land with different desertification degrees (i.e., mild, moderate, severe, and serious) was selected for the field investigation and measurement of the shrub and sand indicators. The morphological characteristics, relationship between the shrub and sand morphological parameters, and influencing factors were analyzed using the Pearson correlation and regression analysis. Consequently, first, we found that the size of the shrub-coppice dunes was different under different desertification degrees and became gradually smaller from serious, severe, and moderate desertification to mild desertification. The shapes of the shrub-coppice dunes on the mild-and moderate-desertification lands were similar to an ellipse in the plane vertical projection and to a semi-ellipsoid in space. Meanwhile, their shapes on the severe- and serious-desertification lands were irregular in the plane vertical projection. The main influencing factors may be related to the abundance of sand source. Second, the correlation coefficient between the morphological parameters of the *Caragana* shrub and sand on sandy land with different desertification degrees was found significant. In particular, the correlation coefficient between the morphological parameters of both on severe- and serious-desertification lands was higher. In general, the long and short axes and the shrub-coppice dune height cooperatively developed. Third, a power function relationship existed between the long and short axes and the height of the *Caragana* shrub under the mild- and moderate-desertification sandy land, which indicated a large room for development. The relationship between the long and short axes and the shrub-coppice dune height on severe-and serious-desertification sandy lands is a quadratic function. This indicates that the shrub-coppice dunes are mature, and the insufficient water supply of the root system can easily lead to the decline of shrubs. The appearance of shrub-coppice dunes is an important landscape sign in the desertification process. The shape of these dunes is closely related to the degree of desertification. However, different from previous studies on the morphological differences of shrub-coppice dunes under different evolution stages in arid and semi-arid areas, the relationship between the morphological characteristics of these dunes and the degree of desertification and the response of the dunes to different desertification degrees have not been clarified. This study links the development status of shrub-coppice dunes with desertification and provides a reference basis for the evaluation of the development stages of land desertification and evolution trend analysis.

**Key words:** *Caragana*; shrub-coppice dunes; morphological characteristics; Otindag Sandy Land